

MC-CDMA Sistemlerde Zaman Paylaşımli Atlamalı İletişim

Time Sharing Hopped Communication in MC - CDMA Systems

Erdoğan AYDIN, Gökhan ÇAM, Nihat KABAOĞLU

Elektronik Mühendisliği Bölümü
Maltepe Üniversitesi
eaydin@maltepe.edu.tr, gcam@maltepe.edu.tr
nihatk@maltepe.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, telsiz bir iletişim sisteminde kanalın mükemmel olmayan cevabı nedeniyle ortaya çıkabilen problemlerin üstesinden gelebilmek amacıyla zaman paylaşımli atlamalı iletişim tekniği önerilmiştir. Önerilen bu teknikte, yönetici mekanizma, kontrolündeki kullanıcıların kendisiyle iletişimini sağlayacak kanalların kalitesini kontrol ederek, her bir kullanıcıya ait kanal kalite bilgisini elde eder. Kanal kalitesi düşük olan kullanıcılara kaliteli bir iletişim sunabilmek için kaliteli kanala sahip kullanıcılar üzerinden verilerini zaman paylaşımli olarak iletme imkanı verir. Bu sayede, sistemdeki düşük kaliteli kanala sahip kullanıcılar için iletişim kalitesi artırılmış olur. Önerilen bu yöntemin başarımı hücresele bir MC-CDMA sistem üzerinde incelenmiştir. Kullanıcı verilerinin çok yollu sönümlemeye sahip kanallar üzerinden iletildiği varsayılmıştır. Atlamalı, atlamasız ve işbirlikli çeşitleme teknikleri için sistemin başarımı bilgisayar benzetimleriyle incelenmiş ve önerilen zaman paylaşımli atlamalı iletişim tekniğinin başarımı gösterilmiştir.

Abstract

In this work, a time sharing hopped communication technique is proposed in order to cope with the problems which result in due to the imperfect channel response in a wireless communication system. In the proposed method, managing mechanism determines each user channel quality knowledge by controlling the quality of the channels between users and it. In order to present a high quality transmission for the users with low quality channels, managing mechanism gives an opportunity to them to send their message over the users with high quality channels in time sharing mode. Thus, transmission quality for the users with low quality channel is improved. The performance of the proposed method is studied on a cellular MC-CDMA system. It is assumed that the users' data is transmitted through multipath flat fading channels. The performance of the system, with/without hopping and with cooperative communication technique, is analysed by computer simulation. Simulation result shows performance of the proposed time sharing hopped communication technique.

1. Giriş

Bir yanda çok taşıyıcılı modülasyonun avantajları, diğer yanda yayılı izge tekniğinin sağladığı esneklik bir çok araştırmacıyı bu iki tekniğin birleşiminden oluşan ve MC-SS (Multi-carrier Spread Spectrum: Çok Taşıyıcılı Yayılı İzge) olarak bilinen yeni bir tekniği ortaya atmaya ve geliştirmeye teşvik etmiştir. Zira, bu birleşim birbirlerinden bağımsız olarak bir çok araştırmacı tarafından, MT-CDMA (Multi-tone Code Division Multiple Access: Çok Tonlu Kod Bölmeli Çoklu Erişim), MC-CDMA (Multi-carrier Code Division Multiple Access: Çok Taşıyıcılı Kod Bölmeli Çoklu Erişim) ve MC-DS-CDMA (Multi-carrier Direct Sequence Code Division Multiple Access: Çok Taşıyıcılı Doğrudan Diziyile Yayılımlı Kod Bölmeli Çoklu Erişim) isimli yeni çoklu erişim teknikleri olarak 1993 yılında yayınlanmıştır [1]-[6].

Mobil haberleşmede karşılaşılan en önemli sorunlardan biri olan çok yollu yayılım problemine çözüm bulmak amacıyla işbirlikli haberleşme çalışmaları son zamanlarda oldukça hız kazanmaktadır. Temel fikri çok kullanıcıli sistemlerde tek bir antene sahip mobil kullanıcıların birbirlerinin antenlerini kullanmalarıyla sanal olarak çok girişli çok çıkışlı bir sistem oluşturulması esasına dayanan işbirlikli çeşitleme çalışmalarının geçmişi [7]'de verilen çalışmaya kadar dayandırılmaktadır. Uzunca bir süre ele alınmayan bu konu günümüz haberleşme sistemleri için uygun bir hale getirilerek Laneman hazırladığı [8]'deki tez çalışması ve bu tezden ürettiği [9]'daki çalışması ile yeniden gündeme getirilmiştir. Bu çalışma çöz ve ilet tekniğinin getirdiği hata yayılma problemini önlemek için önerilmiştir. Esası itibarıyla, yükselt ve ilet tekniğini kullanmaktadır. Sönümlemeli kanalın anlık SNR (Signal to Noise Ratio: Sinyal Gürültü Oranı) değeri yüksekse işbirliği yapılmakta, eğer düşük SNR değeri elde edilirse sistem işbirliksiz olarak çalışmaktadır. İşbirlikli çeşitlemenin en iyi performans veren biçimi olan kodlamalı işbirliği tekniği [10]-[12]'de önerilmiştir. Ancak, bu yöntemler işbirliksiz duruma nazaran daha iyi bir başarıma sahip olsalar da, zaman ve frekans gibi telsiz kaynakların ve rölemele aşamasında güç kaynaklarının verimsiz kullanımı gibi bir takım dezavantajları da beraberlerinde getirmektedirler.

İşbirlikli haberleşme çalışmalarına paralel olarak, benzer çalışmalar çok atlamalı sistemlerde de yürütülmektedir [13]-[15]. Bu tür sistemler verinin rölemeli olarak iletimini esas

aldığı için, yol kaybı etkisi azaltılırken daha az iletim gücü gereksinimi söz konusu olmaktadır. Bu sayede kullanıcılar arası girişim azalmakta ve bunun sonucu olarak da frekansın yeniden kullanılma oranı artmaktadır. Sonuç olarak da, sistem kapasitesi artmaktadır. Ancak, tüm bu avantajların baz istasyonu kontrollü hücrel bir sistem için geçerli olmayacağı açıktır. Bu avantajlar daha çok kontrolü kendi ellerinde bulunduran düğümlerden oluşmuş ad-hoc ağlar için geçerli olabilmektedir.

Gerek işbirlikli haberleşme gerekse atlamalı haberleşme tekniğinin MC-CDMA sistemler üzerinde incelendiği çalışmalar son yıllarda literatürdeki yerini almaktadır [16-18]. [16]'da bir veya daha fazla hareketli terminal için belirlenen ortogonal kodlar yardımıyla radyo kaynaklarının bölüştürülmesi ele alınmıştır. [17]'de işbirlikli haberleşme çerçevesinde, birkaç iletim senaryosu için protokol önerilmektedir. [18]'de sistem performansını optimize etmek için yeni paralel yayılım kodu temelli bilgi iletim yöntemi işbirlikli iletişim çerçevesinde ele alınmıştır.

Bu çalışmada ise, çok yönlü sönmülmenin etkisini azaltmak amacıyla, başarımlı işbirlikli çeşitleme ile rekabet edebilir düzeyde olan, bu tekniğin ve çok atlamalı iletişim tekniğinin getirdiği problemleri azaltması beklenen ve bu iki tekniğin temel prensiplerini bünyesinde barındıran bir zaman paylaşımli atlamalı iletişim yöntemi önerilmiştir. Önerilen bu yöntem MC-CDMA sistemler üzerinde incelenmiştir.

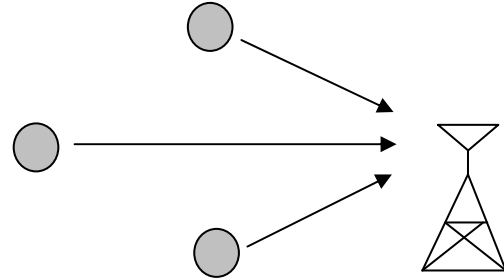
2. MC-CDMA Sistemlerde Zaman Paylaşımli Atlamalı İletişim

2.1. Zaman Paylaşımli Atlamalı İletişim

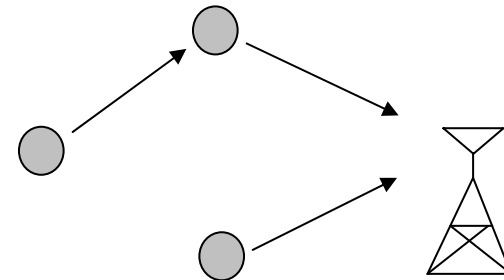
K tane aktif kullanıcının aynı haberleşme ortamını paylaştığı hücrel bir MC-CDMA sistem ele alınsın. Baz istasyonu ile kendisi arasındaki kanalın bozucu etkilerinden dolayı bazı kullanıcılar verilerini kabul edilebilir bir başarımlı ile gönderememektedir. Bu nedenle de arzu edilen haberleşme bazen hiç gerçekleşmemekte bazen de iletişimde istenilen kalite yakalanılamamaktadır. Aynı hücrede başka bir kullanıcı ise baz istasyonu ile daha kaliteli bir iletişim kurabilmektedir. Öyleyse, baz istasyonu ile daha kaliteli iletişim kurabilen kullanıcıdan yararlanarak, baz istasyonu ile kendi arasındaki kanal kalitesi düşük olan kullanıcıya daha kaliteli bir haberleşme olanağı sunulabilir.

Şekil 1' de gösterildiği gibi haberleşmeye başladığı anda baz istasyonu tüm kullanıcılardan daha önceden sisteme tanıtılmış pilot sembollerini göndermesini ister. Baz istasyonu bu pilot sembollerini kullanarak her kullanıcının kanal durum bilgisini elde eder. Kanal kalitesi belirlenen BER (*Bit Error Rate: Bit Hata Olasılığı*) sınırının altında olan kullanıcılar ile kanal kalitesi bu sınırın üstünde olan kullanıcılar birbiriyle eşleştirilir. Eşleştirme işlemi yapılırken eşleştirme kriteri olarak işbirliği yapacak kullanıcılar arası uzaklık esas alınır. Daha sonra baz istasyonu oluşturduğu eşleme bilgisini kullanıcılara iletir. Bundan sonra, kanal kalitesi düşük olan kullanıcılar verilerini sadece eşlerine gönderirler. Eşler aldıkları bu verileri sezip, kendilerine ait yayma kodları ile çarparak baz istasyonuna gönderirler. Bu durum Şekil 2' de

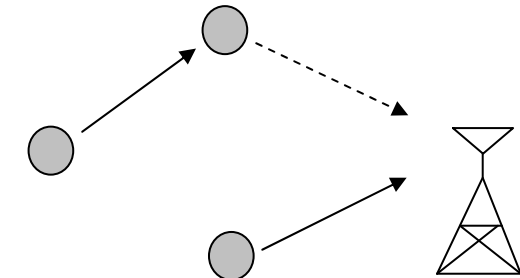
gösterilmiştir. Baz istasyonunda kullanıcı verilerinin karışmaması için yüksek kaliteli kanala sahip olan kullanıcılar zamanda sırasıyla önce kendi verilerini, daha sonra ise eşlerinin verilerini baz istasyonuna yollarlar. Bu süreç Şekil 2, 3 ve 4' de gösterilmiştir. Baz istasyonu belli aralıklarla kullanıcılardan pilot sembollerini isteyerek kanal kalitesinin değişimini inceler ve gerekli ise eşleme bilgisini günceller. Bu çalışmada, pilot gönderme aralıkları boyunca kanalın değişmediği, işbirliği aşamasında eşler arası veri seziminin mükemmel olduğu ve sistemin kusursuz eş zamanlama ile çalıştığı varsayılmaktadır.



Şekil 1: Kullanıcılara ait pilot sembollerinin baz istasyonuna iletilmesi durumu



Şekil 2: Kanalı kaliteli olan kullanıcının kendi verisini baz istasyonuna göndermesi durumu



Şekil 3: Kanalı kaliteli olan kullanıcının eşinin verisini yollaması durumu



m1; kanalı iyi olan kullanıcı verisi
m2; kanalı kötü olan kullanıcı verisi

Şekil 4: İşbirliği sırasında kanalı iyi olan kullanıcının baz

istasyonuna zamanda önce kendi verisini sonra partnerinin verisini yollaması durumu

2.2. Sinyal Modeli

K tane aktif kullanıcının aynı haberleşme ortamını kullandığı sinyal modelini ele alalım. MC-CDMA'de aktif kullanıcılara ait veriler; seriden paralele çevrilir, kendi yayılım kodları ile

çarpılır, IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform: *Ters Ayrık Fourier Dönüşümü*) işleminden geçirilerek alt taşıyıcılar ile modüle edilir, RF taşıyıcı modülasyonunun ardından kanala verilir. Ele alınan çok yollu, düz sönmülemeli kanalın dürtü cevabı

$$h_k(t) = \sum_{s=1}^S g_{k,s} \delta(t - \tau_{k,s}) \quad (1)$$

olarak tanımlanır. Burada S yol sayısını, $g_{k,s}$ karmaşık sönmüleme katsayısını, $\tau_{k,s}$ ise s . yolun gecikmesini ifade etmektedir.

Baz istasyonunun işbirliği yapan kullanıcıların kimliklerini bir matrise atadığı kabul edilsin. Bu matrise \mathbf{I} adı verilsin. Matrisin ilk satırı kaliteli kanala sahip kullanıcıları, ikinci satırı ise düşük kaliteli kanala sahip kullanıcıları içerir. Bu matrisin her bir sütunu işbirliği yapacak eşleri göstermektedir. İşbirliği yapmayan kullanıcıların kimliklerinin ise \mathbf{I}_y ile gösterilen bir vektöre atandığı farz edilsin.

Ahıcıda, alınan sinyal uygun hızda örneklendikten sonra, seriden paralele dönüştürülür, ardından da elde edilen ayrık zamanlı sinyale DFT işlemi uygulanır. İncelemede kolaylık sağlaması bakımından, elde edilen bu sinyal, zaman paylaşımı esasına göre ele alınır:

i) Kaliteli kanala sahip kullanıcıların kendi verisini yolladığı aşama ele alınırsa (2) eşitliği elde edilir:

$$\mathbf{y}(m) = \sum_n \mathbf{b}_n(m) \mathbf{C}_n \mathbf{F} \mathbf{h}_n + \mathbf{w}(m) \quad m=1,2,\dots,M \quad (2)$$

Burada, $n = \mathbf{I}(1,1), \mathbf{I}(1,2), \dots, \mathbf{I}(1,L), \mathbf{I}_y(1), \mathbf{I}_y(2), \dots, \mathbf{I}_y(K-2L)$ olarak tanımlanmaktadır. Bu ifadede L işbirliği sayısını belirlemektedir. İşbirliği sırasında baz istasyonuna sinyal gönderen kullanıcı sayısı ise $N = K - L$ olarak tanımlanır. $\mathbf{b}_n(m)$, m ' inci verisini baz istasyonuna gönderen n ' inci

kullanıcının verisidir. $\mathbf{C}_n = \text{diag}(\mathbf{c}_n)$; $\mathbf{c}_n = [c_{n,1}, c_{n,2}, \dots, c_{n,p}]^T$ n ' inci kullanıcının yayılım kodudur. $\mathbf{F} \in \mathbb{C}^{Ps \times Ps}$ DFT matrisi olup (p,s) . elemanı $e^{-j2\pi ps/p}$ dir. $\mathbf{w}(m) \in \mathbb{C}^{Ps \times 1}$ bağımsız, özdeş dağılıma sahip sıfır ortalamalı, σ^2 varyanslı Gauss vektörüdür.

ii) Kaliteli kanala sahip kullanıcıların eşlerinin verisini yolladığı aşama ele alınırsa (3) eşitliği elde edilir:

$$\mathbf{y}(m) = \sum_{n,j} \mathbf{b}_j(m) \mathbf{C}_n \mathbf{F} \mathbf{h}_n + \mathbf{w}(m) \quad m=1,2,\dots,M \quad (3)$$

Burada, $j = \mathbf{I}(2,1), \mathbf{I}(2,2), \dots, \mathbf{I}(2,L), \mathbf{I}_y(1), \mathbf{I}_y(2), \dots, \mathbf{I}_y(K-2L)$ olarak tanımlanmaktadır.

2.2.1. Kanal Kestirimi

Bir çerçevenin M adet bittin oluştuğunu varsayalım. (2) ve (3) eşitliğindeki ifadeler benzer olduğu için yalnızca (3) eşitliğinin matrisel bir yapıda gösterimi (4) eşitliğinde verilmiştir.

$$\mathbf{y} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{b}_1(1) \mathbf{C}_{n_1} \mathbf{F} & \mathbf{b}_2(1) \mathbf{C}_{n_2} \mathbf{F} & \dots & \mathbf{b}_N(1) \mathbf{C}_{n_N} \mathbf{F} \\ \mathbf{b}_1(2) \mathbf{C}_{n_1} \mathbf{F} & \mathbf{b}_2(2) \mathbf{C}_{n_2} \mathbf{F} & \dots & \mathbf{b}_N(2) \mathbf{C}_{n_N} \mathbf{F} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{b}_1(M) \mathbf{C}_{n_1} \mathbf{F} & \mathbf{b}_2(M) \mathbf{C}_{n_2} \mathbf{F} & \dots & \mathbf{b}_N(M) \mathbf{C}_{n_N} \mathbf{F} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{h}_{n_1} \\ \mathbf{h}_{n_2} \\ \vdots \\ \mathbf{h}_{n_N} \end{bmatrix}}_{\mathbf{h}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{w}(1) \\ \mathbf{w}(2) \\ \vdots \\ \mathbf{w}(M) \end{bmatrix}}_{\mathbf{w}} \quad (4)$$

(4) eşitliği matris-vektör yapısında ifade edilirse

$$\mathbf{y} = \mathbf{A} \mathbf{h} + \mathbf{w} \quad (5)$$

eşitliği elde edilir. Burada, $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{MPs \times NS}$, $\mathbf{h} \in \mathbb{C}^{NS \times 1}$ ve $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{MPs \times 1}$ dir.

BLUE (Best Linear Unbiased Estimator: En İyi Doğrusal Yansız Kestirimci) kestirim yöntemi kullanılarak kanal bilgisi

$$\hat{\mathbf{h}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{y} \quad (6)$$

olarak elde edilir [16].

2.2.2. Veri Sezimi

(6) eşitliğinde kestirilen kanal vektörleri veri sezimi için kullanıldığında (7) ifadesi elde edilir.

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{1,1} & \mathbf{Q}_{1,2} & \dots & \mathbf{Q}_{1,y} \\ \mathbf{Q}_{2,1} & \mathbf{Q}_{2,2} & \dots & \mathbf{Q}_{2,y} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Q}_{x,1} & \mathbf{Q}_{x,2} & \dots & \mathbf{Q}_{x,y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{b}_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta}_1 \\ \boldsymbol{\eta}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\eta}_N \end{bmatrix} \quad (7)$$

Burada, $\boldsymbol{\eta}_n \in \mathbb{C}^{Ms \times 1}$ lerden oluşan $\boldsymbol{\eta} \in \mathbb{C}^{MMs \times 1}$, (5) eşitliğindeki \mathbf{w} ' nin uyumlu süzgeçten geçmiş halini temsil etmektedir. $\mathbf{Q}_{x,y}$ ise aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\mathbf{Q}_{x,y} = \begin{bmatrix} \rho_{xy} \mathbf{Fh}_x & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \rho_{xy} \mathbf{Fh}_y & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \rho_{xy} \mathbf{Fh}_y \end{bmatrix}_{M \times M} \quad \begin{array}{l} x=1,2,\dots,N \\ y=1,2,\dots,N \end{array} \quad (8)$$

(7) eşitliği matris-vektör yapısında gösterilirse aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\mathbf{y} = \mathbf{Q}\mathbf{b} + \boldsymbol{\eta} \quad (9)$$

Burada, $\mathbf{Q} \in \mathbb{C}^{MN \times MN}$ ve $\mathbf{b} \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$ dir. BLUE kestirim yöntemi kullanılarak veri sezimi

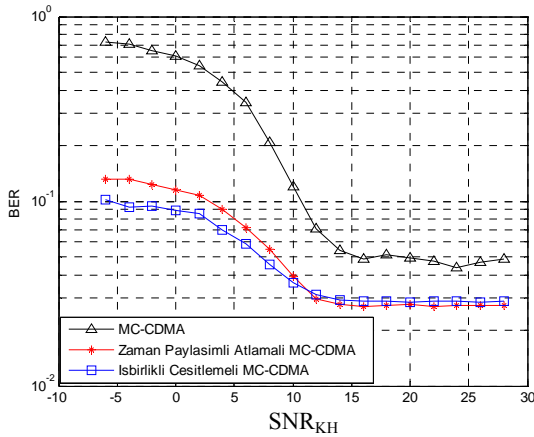
$$\hat{\mathbf{b}} = (\mathbf{Q}^T \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{Q}^T \mathbf{y} \quad (10)$$

eşitliği ile gerçekleştirilebilir [19].

3. Bilgisayar Benzetimleri

Önerilen yapının bilgisayar benzetimlerini gerçekleştirebilmek için hüresel bir MC-CDMA sistemi ele alınmıştır. Benzetim parametreleri; kullanıcı sayısı $K=3$, atlamalı haberleşme anında baz istasyonuna sinyal gönderen kullanıcı sayısı $N=2$, her bir kullanıcının çerçeve boyu $M=16$, yol sayısı $S=4$, bir yayma kodu uzunluğu $P=16$ olarak seçilmiştir.

Önerilen zaman paylaşımli atlamalı MC-CDMA sistem ile çöz ve aktar esasına dayalı işbirlikli çeşitlenmeli MC-CDMA ve MC-CDMA sistemleri ele alınmıştır. Bu üç sistem için önce düz sönümlenmeli kanalın bilgisi elde edilmiş, ardından da veri sezimi işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu işlemler sonucunda incelenen sistemlerin başarımları BER karşılaştırması yapılarak elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar Şekil 5'de gösterilmiştir. (Şekilde yatay eksen gösterene SNR_{KH} ifadesindeki KH kısaltması "Kaynaktan Hedefe" anlamı taşımaktadır.) Şekil 5'den, düşük SNR değerleri için önerilen zaman paylaşımli atlamalı iletişim tekniğinin işbirlikli çeşitlenmeli iletişimle rekabet edebilecek düzeyde bir başarıma sahip olduğu, yüksek SNR değerleri içinse neredeyse aynı başarıma sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5: Önerilen tekniğin işbirliği olmayan durum ve işbirlikli çeşitlenme ile karşılaştırması

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, düz sönümlenmeli çok yollu kanallar üzerinden haberleşen hüresel bir MC-CDMA sistem ele alınmıştır. Ele alınan bu sistem için bir zaman paylaşımli atlamalı iletişim tekniği önerilmiştir. Önerilen bu tekniğin başarımı, sönümlenmeli kanalların bozucu etkisini azaltmak amacıyla önerilen, son yıllarda hakkında birçok çalışma yapılan, işbirlikli çeşitlenme tekniği ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada kullanılan işbirlikli çeşitlenme tekniğinin çöz ve aktar esasına göre çalıştığı varsayılmıştır. Sonuç olarak, önerilen tekniğin ele alınan işbirlikli çeşitlenmeyle rekabet edebilir düzeyde bir başarıma sergilediği görülmüştür. Bundan sonraki çalışmalarda, önerilen zaman paylaşımli atlamalı iletişim tekniğinin iteratif kestirim yöntemleri ile bütünleştirilmeye çalışılması ve kullanıcılar arası iletişimin mükemmel olmadığı durumda sistem performansının sınanması amaçlanmaktadır.

5. Kaynaklar

- [1] Vandendorpe, L., "Multitone Direct Sequence CDMA System in an Indoor Wireless Environment", in *Proc. of IEEE First Symposium of Communications and Vehicular Technology*, the Benelux, Delft, The Netherlands, pp. 4.1.1-4.1.8, Oct. 1993.
- [2] Yee, N., Linnartz, J-P. and Fettweis, G., "Multicarrier CDMA in Indoor Wireless Radio Networks", in *Proc. of IEEE PIMRC '93*, Yokohama, Japan, pp.109-113, Sept. 1993.
- [3] Fazel, K. and Papke L., "On the Performance of Convolutionally-Coded CDMNOFDM for Mobile Communication System", in *Proc. of IEEE PIMRC '93*, Yokohama, Japan, pp.468-472, Sept. 1993.
- [4] Fazel, K., "Performance of CDMA/OFDM for mobile communications system", in *Proc. IEEE International Conference on Universal Personal Communications (ICUPC'93)*, Ottawa, Canada, pp. 975-979, Oct. 93.
- [5] Kondo, S. and Milstein, L.B., "On the use of multicarrier direct sequence spread spectrum systems", in *Proc. IEEE Military Communications Conference (MILCOM'93)*, Boston, USA, pp. 52-56, Oct. 1993.
- [6] Chouly, A., Brajal, A. and Jourdan, S., "Orthogonal Multicarrier Techniques Applied to Direct Sequence Spread Spectrum CDMA Systems", in *Proc. of IEEE GLOBECOM '93*, Houston, USA, pp.1723-1728, Nov. 1993.
- [7] Cover, T.M. and El Gamal, A.A., "Capacity theorems for the relay channel", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 25, no. 5, Sept. 1979.
- [8] Laneman, J.N., "Cooperative diversity in wireless networks: Algorithms and architectures", *Ph.D. Thesis*, Massachusetts Institute of Technology, August 2002.
- [9] Laneman, J.N., Wornell, G.W., and Tse, D.N.C., "An Efficient Protocol for Realizing Cooperative Diversity in Wireless Networks", in *Proc. IEEE ISIT, Washington, DC*, p. 294, June 2001.
- [10] Sendonaris, A., Erkip, E. and Aazhang B., "User cooperation diversity. Part I. System description", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no.11, pp. 1927-1938, Nov. 2003.

- [11] Sendonaris, A., Erkip, E. and Aazhang B., "User cooperation diversity. Part II. Implementation Aspects and Performance Analysis", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no.11, pp. 1939-1948, Nov. 2003.
- [12] Janani, M., Hedayat, A., Hunter, T.E. and Nosratinia, A., "Coded Cooperation in Wireless Communications: Space-Time Transmission and Iterative Decoding", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 52, no. 2, pp. 362-71, Feb. 2004.
- [13] Larsson, P., "Selection Diversity Forwarding in a Multihop Packet Radio Network with Fading Channel and Capture," *Mobile Comp. Commun. Rev.*, vol. 5, no. 4, pp. 47-54, Oct. 2001.
- [14] Boyer J., Falconer D.D. and Yanikomeroglu, H., "A theoretical characterization of the multihop wireless communications channel with diversity", in *Proc. GLOBECOM*, San Antonio, TX, pp. 841-845, Nov. 2001.
- [15] Hansa, M.O. and Alouini, M.-S., "Performance analysis of two-hop relayed transmissions over Rayleigh fading channels", in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, Birmingham, AL, pp. 1992-1996, 2002.
- [16] Ohseki, T., Fuke, N., Maeshima, O., Iwai, H., Sugiyama, K. and Nohara, M., "Multihop Mobile Communications System using MC-CDMA in Forward links" *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Vol. 1, pp. 189 - 194, March 2005.
- [17] Assalini, A., Malimpensa, D. and Pupolin, S., "A cooperation strategy for MC-CDMA systems" , in *Proc. Wireless Reconfigurable Terminals and Platforms (WiRTep)*, Rome, Italy, April 2006.
- [18] Park, H. and Lim, J., "Cooperative Communication Network With Parallel Spreading Method For MC-CDMA Systems" in *Proc. IEEE Military Communications Conference (MILCOM'07)*, Orlando, FL, USA, pp. 1-6, Oct. 2007.
- [19] Kay, S.M., *Statistical Signal Processing: Vol. 1: Estimation Theory*, Prentice Hall Inc., 1998.